

小径白金球のポリマー水溶液中への浸漬時の強制対流膜沸騰におけるMHF点温度と蒸気膜崩壊様相

島岡三義 中村篤人 池田修啓*

MHF Point Temperature and Behavior of Vapor Film Collapse under Forced Convection Film Boiling Due to Quenching of Small Platinum Sphere into Polymer Aqueous Solution

Mitsuyoshi SHIMAOKA, Shigeto NAKAMURA and Nobuhiro IKEDA

It is necessary to improve the repeating characteristics of the immersion quenching experiment in the rotary-arm-type quenching test system. The vapor film around the Pt sphere at the tip of the rotary-arm collapses not only due to the temperature, but also due to the surrounding flow conditions. Therefore, the authors have been examined whether the vapor film can be forcibly collapsed by shaking or rotating the arm, or whether the repeatability of the immersion quenching experiment can be improved. Using a polymer with an aqueous solution concentration of 20 vol.% by volume as a coolant, and the rotating arm was rotated in five swing patterns at a tangential velocity in the range of 30 to 180 mm·s⁻¹. In the case of the tangential velocity is 180 mm·s⁻¹, on the arm swing patterns that are the maximum rotation angle of 120° and the return angle of 60° (type A), and the maximum rotation angle of 100° and the return angle of 20° (type D), MHF point temperatures were relatively good agreement. In the case of the arm swing pattern A, the MHF point temperature was increased with the tangential velocity. In addition, the relatively good agreement of MHF point temperature was confirmed in the tangential velocities of 70 mm·s⁻¹ and of 180 mm·s⁻¹. The collapse of the vapor film around the Pt sphere was often observed at a location other than the connecting point of the Pt sphere and the arm. In the case of the tangential velocity of 30 mm·s⁻¹, as the collapse type of vapor film, not only the ruptured type but also the turned up type, which is more interesting, was observed.

1. はじめに

筆者らは、金属材料の焼入れ用冷却剤の冷却特性を把握するための、小型で操作が簡便で、しかもメンテナンスが容易な試験装置の開発を進めてきた⁽¹⁾。この装置によって、回転半径100mmのアームの先端に直径4mmの白金球を取り付け、白金球を所定の温度に加熱した後に、アームを回転させて冷却剤中に浸漬急冷し、白金球に挿入した熱電対によって白金球の急冷開始温度その他の冷却剤の冷却特性を調べている。アームの回転角速度を任意に設定可能なため、冷却剤中での白金球の移動速度を変化でき、白金球支持アーム軸と重力方向とのなす角度が時々刻々変化することから、多様な蒸気膜崩壊挙動が観察されている⁽²⁾・⁽⁸⁾。なお、アーム回転用のモーターの回転が滑らかでなく回転ムラがある場合（回転角度分解能が1.8degree/revolution）は、揺動振動により蒸気膜が強制的に崩壊さ

れることが観察され、回転角速度が小さい場合により顕著であった⁽¹⁾・⁽³⁾。そのため、アーム回転用モーターの回転角度分解能を192000pulse/revolutionに高めて揺動振動が生じないようにした⁽⁴⁾。

ところで、白金球を加熱する際に熱伝導によって支持アームも加熱されるが、アームの直径が0.5mmなので、アームまわりの蒸気膜が白金球まわりの蒸気膜より先行して崩壊することから、白金球まわりの蒸気膜崩壊起点は白金球とアームの接続部になり、爆発的に崩壊すると考えられる。しかし、ポリマー水溶液においては、高速度ビデオカメラによる観察から、蒸気膜崩壊起点は接続部に限らず、蒸気膜形成が冷却剤の沸点近傍まで保持される場合は、蒸気膜が白金球面で捲れるように崩壊することもあった⁽⁶⁾・⁽⁸⁾。筆者らは種々のアームの回転角速度およびアーム回転停止角度で浸漬急冷実験を行ってきたが、蒸気膜がアーム回転中に崩壊する場合もあれば、アーム停止後に崩壊する

* 大同化学工業（株）奈良生産技術事業所技術研究所

場合もあるものの、いずれも自発的な崩壊であった。同一条件で複数回実験したときの白金球の急冷開始温度、すなわち、特性温度にはばらつきが生じることが避けられず、ばらつきの原因を探ってきている。特性温度はばらつきが、膜沸騰段階の冷却曲線は良く一致しており、蒸気膜崩壊起点がアーム接続部に限らないことから、ばらつきの原因を解明できていない。

そこで本研究では、特性温度がばらつく原因の一つは、自発的に蒸気膜が崩壊することであると考へ、蒸気膜を強制的に崩壊させることで特性温度のばらつきを抑制することを試みた。

2. 実験装置および実験方法

白金（純度 99.95 wt%, Pt）球（直径 $d = 4\text{mm}$ ）に直径が 0.5mm の貫通穴をあけ、Pt 球の保持と温度測定用 K 型シース熱電対（素線径が 0.08mm, シース外径が 0.25mm）を保護するための Pt 管（外径 0.5mm, 内径 0.3mm）を通してレーザー溶接した。さらに、反対側から Pt 小球中心部まで Pt 棒を挿入して端面をレーザー溶接して球面に研磨した。液体冷却剤の Pt パイプ内への進入を阻止するために、いくつかのステンレス製金具で構成した。熱電対シース部だけでは Pt 球を支えきれないため、熱電対の保護管とそれを支える管を二重にして回転アーム（支持棒体）とした。

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。アーム回転用モーターの回転軸に取り付けたフレームに、高速度ビデオカメラを設置し、フレームレートを、 $FR = 2000\text{fps}$ 、シャッター開放時間を 0.5ms として回転移動する Pt 球まわりの蒸気膜形成並びに崩壊挙動を観察した。対向設置したハロゲンランプヒーターで Pt 球を加熱し、 870°C に達した後に Pt 小球が冷却液体表面上 1 mm の位置までは Pt 球中心の周

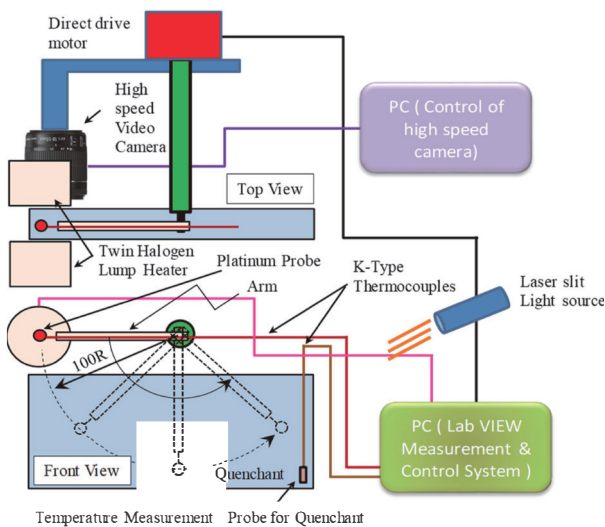


Fig. 1 Schematic illustration of the experimental apparatus.

速度（以後、「接線速度」と記す）を $V_0 = 140\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ で回転させ、 850°C に低下した後にポリマー水溶液（大同化

学工業（株）製、水溶性焼入れ液ソリュブルクエンチ、ZN-04、20 vol.% 水溶液、640cc、 $30 (29 \sim 34)^\circ\text{C}$ ）中に浸漬、急冷した。蒸気膜を強制崩壊させるために、Fig. 2 に示すように、アームを振り子のように回転させた。Pt 球の接線速度は $V = 5 \sim 180 \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲とした。Pt 球中心温度と表面温度には無視しがたい温度差が生じると考えられるが、本研究では特性温度に相当する膜沸騰極小熱流束（Minimum Heat Flux, MHF）点温度に着目することから、便宜的に集中熱容量近似して冷却曲線、冷却速度、熱流束および熱伝達率を求めることとした。なお、こ

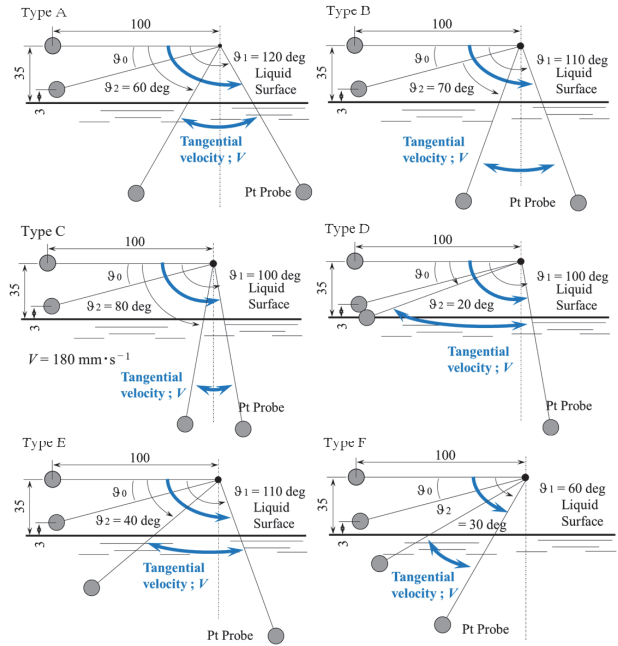


Fig. 2 Swing patterns of the rotary-arm.

れらの計算においては、Pt の密度と定圧比熱に温度依存性を持たせた⁽¹⁾。同一条件での浸漬実験を 10 回実施して実験の繰り返し特性も調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 $V = 30 \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合の冷却過程

Pt 球の接線速度が $V = 30 \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合、アームを水平位置から 120° 程度以上回転させると蒸気膜が崩壊した。アーム最大回転角度が 120° 、戻し角度 60° の Type A での冷却曲線を Fig. 3 に示す。アーム回転角度が 120° に到達以前に Pt 球の温度低下が急変しているのは、自発的に蒸気膜が崩壊していることを示す。 120° で折り返して蒸気膜が崩壊しているケースが多いが、温度低下の急変、すなわち、MHF 点温度は $200 \sim 120^\circ\text{C}$ の範囲にばらついており、この程度の接線速度ではアームを振り子のように振って蒸気膜を強制的に崩壊させることはできないことがわかった。なお、蒸気膜が崩壊する以前の膜沸騰段階の冷却曲線は一致しており、Pt 球の冷却剤突入時の空気の巻き込みやアームまわりの蒸気膜の形成・崩壊挙動に大きな違いはないものと考えられる。

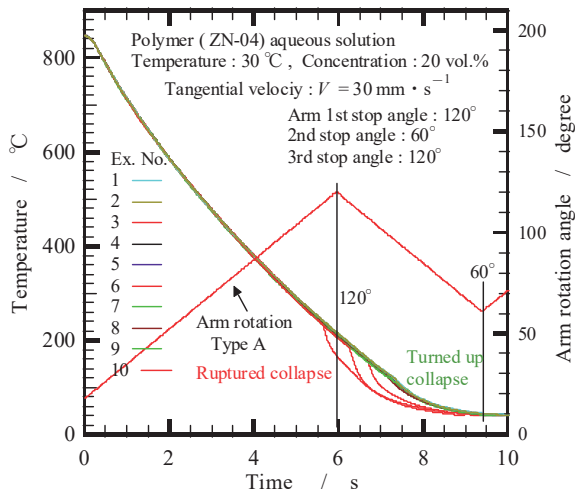


Fig. 3 Cooling curves at $V = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and in the arm swing type A.

$V = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ではアームの停止の衝撃では蒸気膜を崩壊させることはできないことがわかったが、アーム最大回転角度が 60° 、戻し角度 30° の Type F では、Fig. 4 に示すように、最初のアーム回転の折返しでは蒸気膜が崩壊しないものの、アーム回転振幅が小さいために、MHF 点温度のばらつきは小さくなっている。

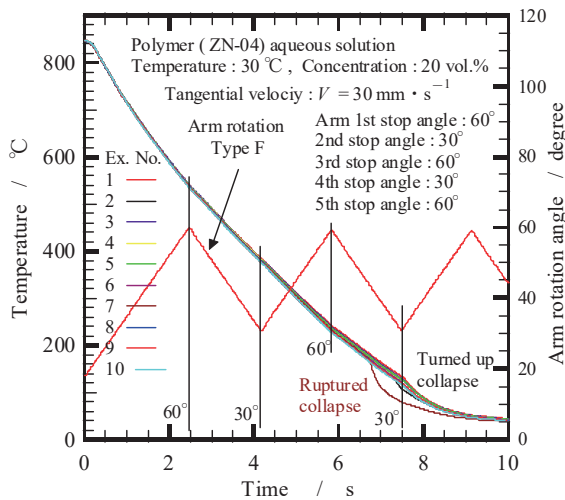


Fig. 4 Cooling curves at $V = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and in the arm swing type F.

また、この接線速度では MHF 点温度は 200°C 程度以下になると考えられ、蒸気膜が何らかの外乱で崩壊する場合は爆発的あるいは破裂的崩壊（崩壊音を伴う）と言えるもので、崩壊温度が低くなるほど捲れ型崩壊（崩壊音は伴わないか極めて小さかった）であった。

MHF 点温度が約 189°C の爆発的崩壊の様相を Fig. 5 に示す。崩壊起点は Pt 球進行方向下部で Pt 球とアームの接続部ではないことがわかる。蒸気塊が激しく攪拌しながら縮小していき、Pt 球面を覆った微小な蒸気泡が徐々に凝

縮して消滅していった。

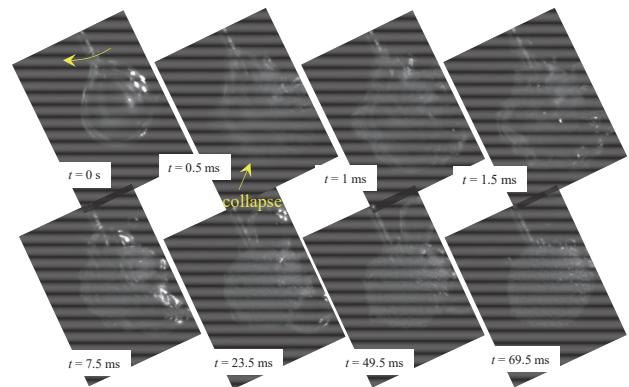


Fig. 5 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

一方、MHF 点温度が約 123°C の場合は、Fig. 6 に示すような捲れ型崩壊であった。この場合の蒸気膜崩壊起点もアーム接続部ではなく、Pt 球進行方向下部からアーム接続部に向かって、蒸気膜が剥がれるというよりは捲れるような感じで崩壊していた。Pt 球面上の蒸気膜の消滅は早かったが、蒸気膜の崩壊が冷却剤の沸点近傍であり、冷却剤との温度差も小さいために、アームに付着した蒸気塊の凝縮には時間を要していた。なお、図中の時間経過を示す t は蒸気膜崩壊直前を起点にしており、以下の蒸気膜崩壊様相図においても同様である。

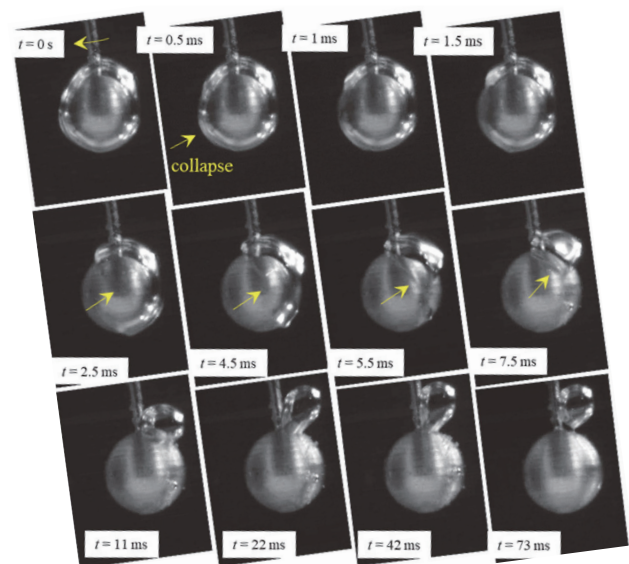


Fig. 6 High speed video images of vapor film formation and its turned up type collapse pattern at $V = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.2 アーム回転振動が Type A における MHF 点温度に及ぼす接線速度の影響

接線速度の増大に伴ってアームの折返し前後の減速度や

加速度が大きくなるので、Pt 球まわりの蒸気膜の強制崩壊が起こりやすいと考えられる。接線速度が $V = 70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合、Fig. 7 に示すように、蒸気膜崩壊は3度目の折返し点近傍で生じていて MHF 点温度のばらつきも非常に小さくなっている。浸漬急冷実験の繰り返し特性が極めて良好であるが、MHF 点温度は 200°C 付近であり、 $V = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合より高くなっており、蒸気膜崩壊パターンは爆発的で、捲れ型崩壊は観察されなかった。

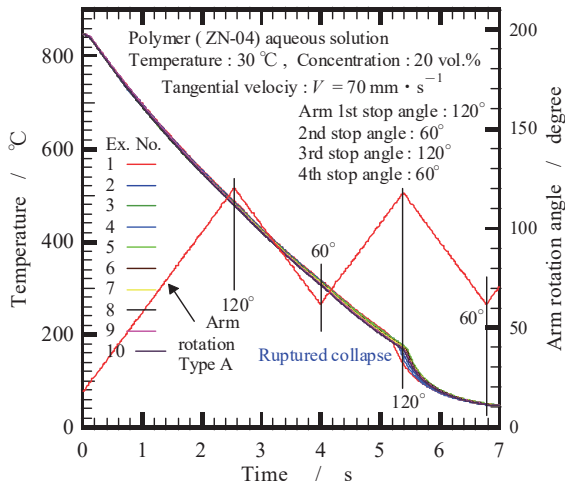


Fig. 7 Cooling curves at $V = 70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and in the arm swing type A.

蒸気膜の崩壊様相を Fig. 8 に示すが、Fig. 5 と同様の崩壊様相であり、蒸気塊の攪拌の激しさは温度的には膜沸騰を維持できるのに、アームの停止から急移動の衝撃による強制崩壊であることを示すものと言える。

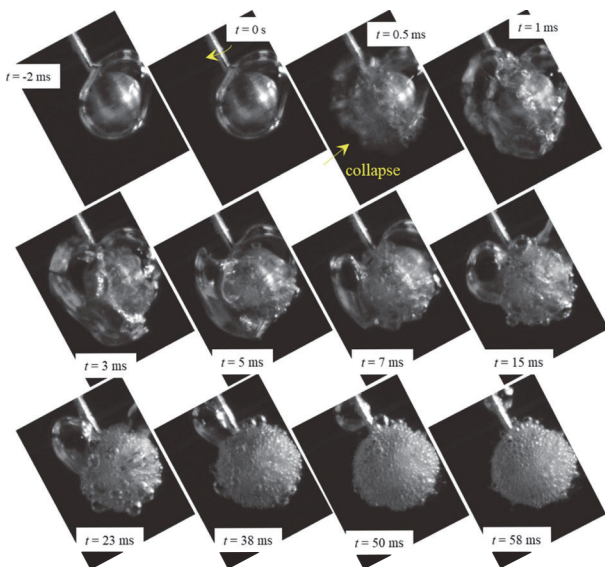


Fig. 8 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

接線速度が $V = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合の冷却曲線と熱伝達率曲線を Fig. 9 に示す。蒸気膜崩壊のタイミングがアーム回転の2度目の折返し後、3度目の折返し後および4度目の折返し後の3パターンが現れるようになった。MHF 点温度が約 405°C 、約 279°C および約 176°C での蒸気膜崩壊様相を Fig. 10 ~ Fig. 12 に示す。当然のことながら、膜沸騰段階の冷却過程に違いがほとんどないので、蒸気膜の崩壊が早いほど MHF 点温度が高くなっているが、崩壊温度が高いほど Pt 球の蒸気塊の存在時間が長くなってい

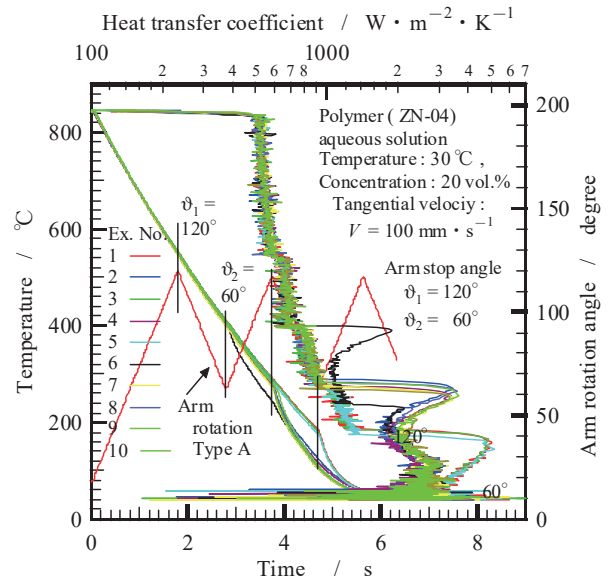


Fig. 9 Cooling curves and heat transfer coefficients at $V = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and in the arm swing type A.

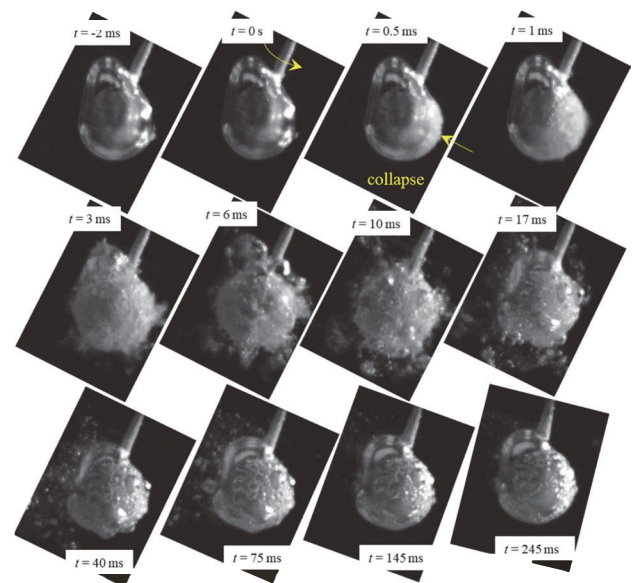


Fig. 10 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (1, MHF point temperature is 405°C).

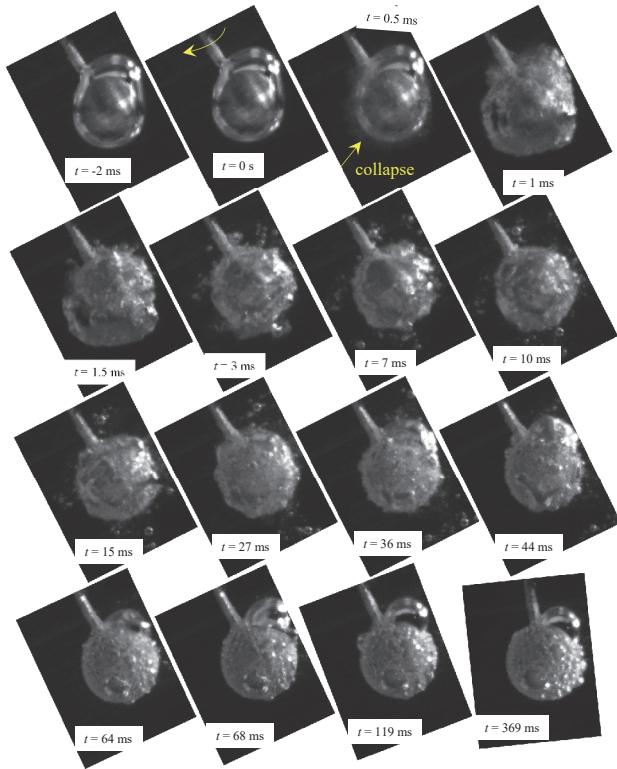


Fig. 11 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (2, MHF point temperature is 279°C).

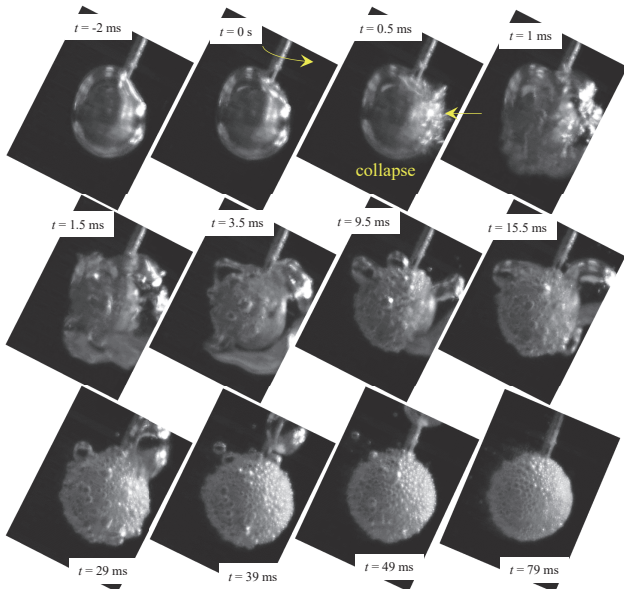


Fig. 12 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (3, MHF point temperature is 176°C).

た。

接線速度が $V = 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合の冷却曲線と熱伝達率曲線を Fig. 13 に示すが、 $V = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合と同様のタイミングで蒸気膜が崩壊していた。MHF 点温度

は蒸気膜崩壊が遅い順に約 280°C 、約 384°C 、約 488°C となっており、それぞれの蒸気膜崩壊様相を Fig.14 ~ Fig.16 に示すが、崩壊温度が高いほど蒸気膜の破裂が激しく、活発な核沸騰時間が長くなっていた。接線速度の増大に伴い、強制対流の効果を受けて膜沸騰段階の冷却が速くなっており、MHF 点温度は $V = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合よりいずれの崩壊のタイミングにおいても約 100°C 程度上昇していた。

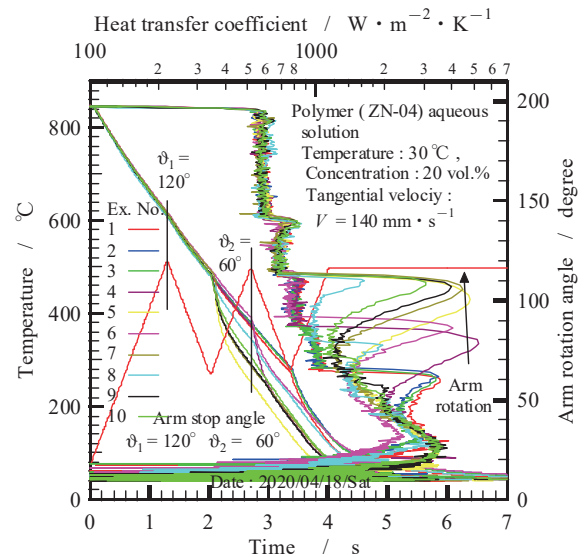


Fig. 13 Cooling curves and heat transfer coefficients at $V = 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and in the arm swing type A.

なお、蒸気膜崩壊後の蒸気塊は $V = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合より大きくはなく、固液接触が活発と思われる、核沸騰極大熱伝達率は高くなっていた。

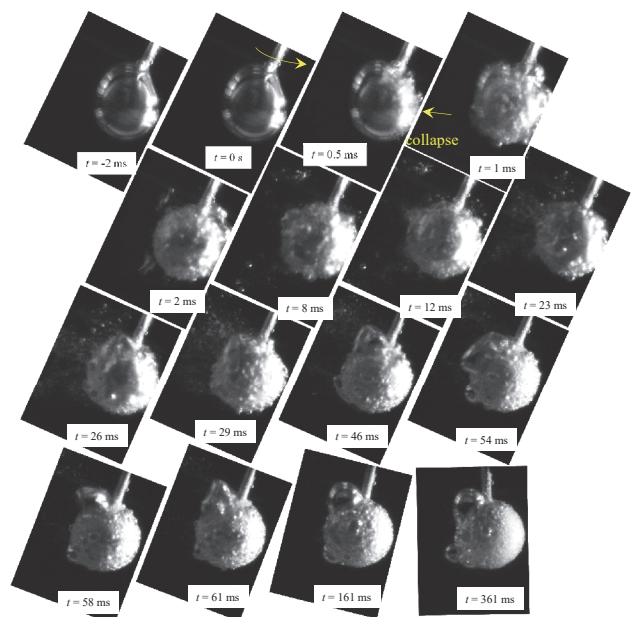


Fig. 14 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (1, MHF point temperature is 488°C).

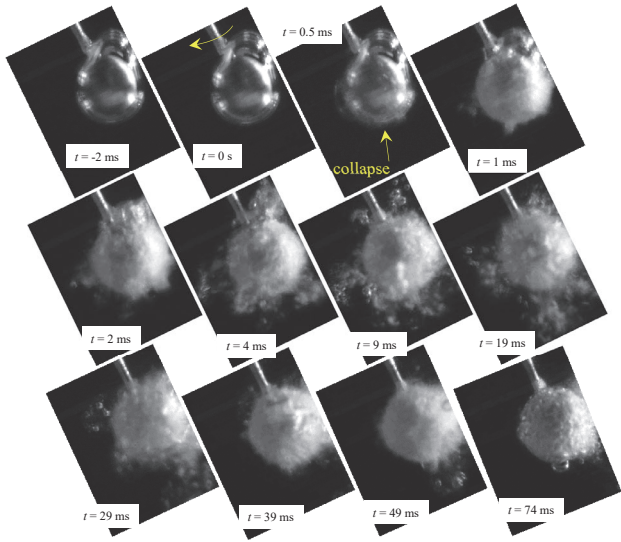


Fig. 15 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (2, MHF point temperature is 384°C).

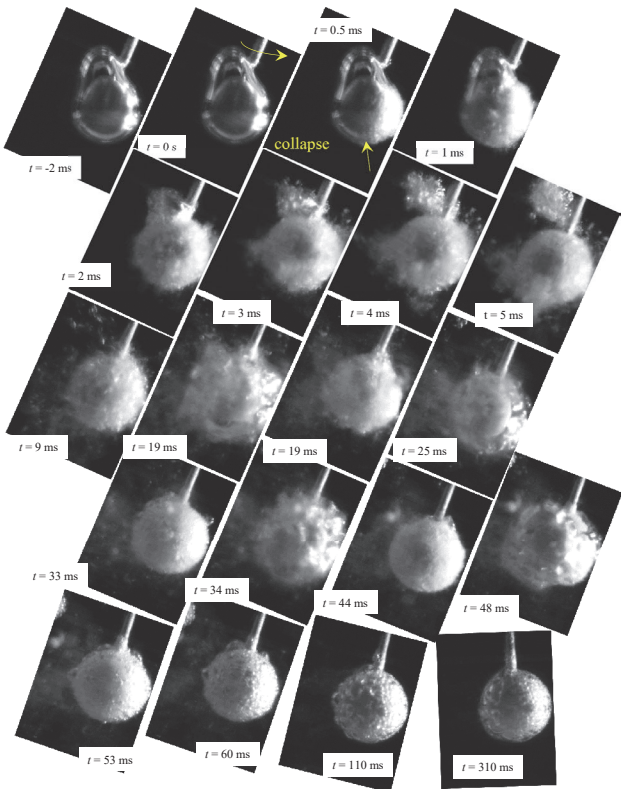


Fig. 16 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (3, MHF point temperature is 280°C).

接線速度が最も大きい $V = 180 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合の冷却曲線と熱伝達率曲線を Fig. 17 に示す。この接線速度になると蒸気膜の崩壊のタイミングはアーム回転の2度目の折返し後だけになっていた。接線速度が $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上になると、アーム回転の最初の折返し時に蒸気膜の揺らぎ

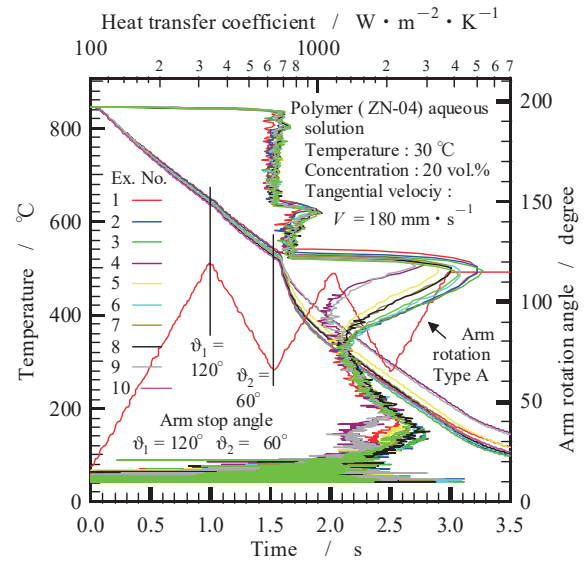


Fig. 17 Cooling curves and heat transfer coefficients at $V = 180 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and in the arm swing type A.

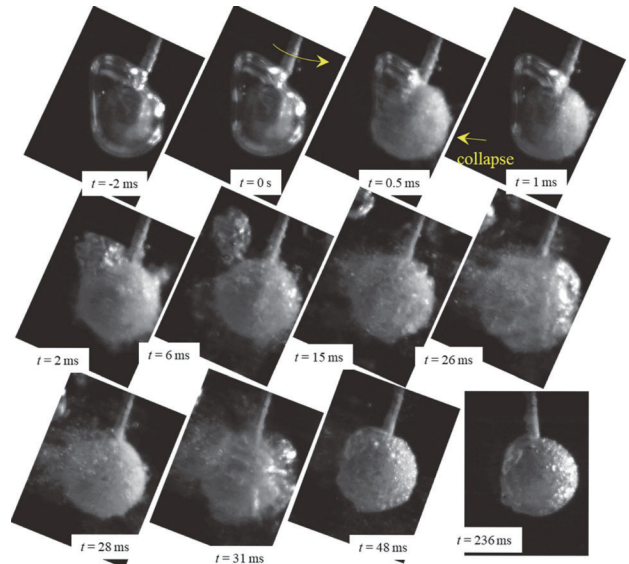


Fig. 18 High speed video images of vapor film formation and its ruptured type collapse pattern at $V = 180 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

による熱伝達率の一時的な増大が見られるようになったが、接線速度の増大に伴い熱伝達率の増大が顕著になっている。また、Fig. 18 に示す蒸気膜崩壊様相と Fig. 17 から、蒸気膜崩壊後も蒸気塊の拡張が観察され、アームの回転の折返しの際に冷却曲線の変動が認められた。Fig. 18 の MHF 点温度は約 524°C であり、本実験範囲では最も高い。

Type A における接線速度と MHF 点温度の関係を Fig. 19 に示す。接線速度の増大に伴って MHF 点温度が上昇している。このことは、焼入れ時に焼入れ材を攪拌急冷する場合に、攪拌の仕方によって MHF 点温度、すなわち、急冷開始温度である特性温度を制御できることを示唆している。しかしながら、接線速度が $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ と 140

$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合は MHF 点温度が複数存在することから、冷却剤の冷却特性を評価するには適切な接線速度が存在すると言える。

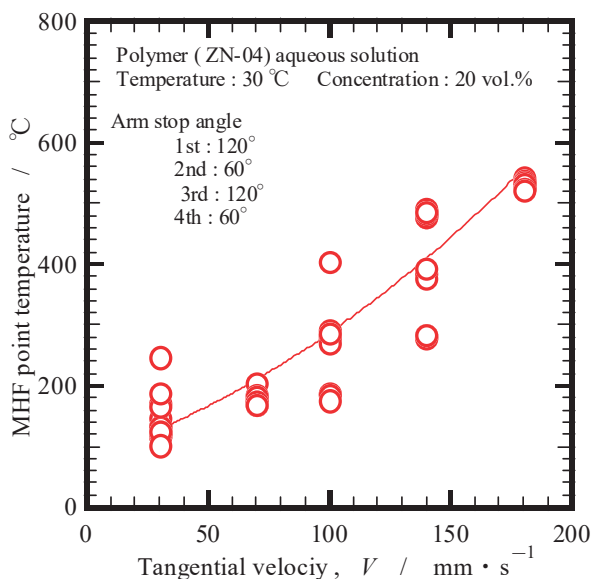


Fig. 19 Effect of tangential velocity on MHF point temperature in the arm swing type A.

3.3 MHF 点温度に及ぼすアーム回転揺動パターンの影響

アーム回転揺動パターンが Type A の場合, Fig. 19 から, MHF 点温度のばらつきが $V = 70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ と $V = 180 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ において小さくなることがわかった。そこで $V = 180 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合で, アーム回転揺動パターンがどのタイプであれば MHF 点温度のばらつきが小さくなるかを調べた。その結果を Fig. 20 に示す。最も MHF 点温度の

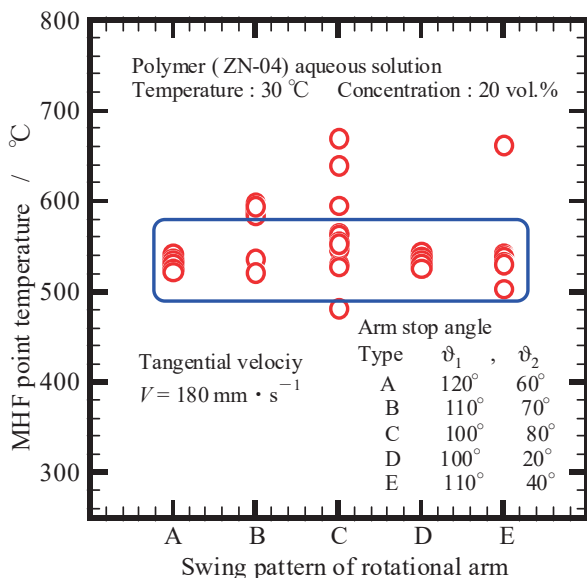


Fig. 20 Change in MHF point temperature at $V = 180 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ due to arm swing type.

ばらつきが小さいのは Type A (最大回転角度が 120° , 戻し角度 60°) と Type D (最大回転角度が 100° , 戻し角度 20°). 戻し角度が 20° では Pt 球が冷却剤液面近傍まで戻ることになるが, 設定角度を超えないようにモーター制御を行っているため, 接線速度が $180 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ では 25° 程度で折り返しており, Pt 球は完全に冷却剤中で冷却されている。)であった。また, $V = 180 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ではアーム回転揺動パターンをどのように設定しても, MHF 点温度は 500°C を下回らないものと考えられる。

4. おわりに

回転アームの先端に取り付けた Pt 球を冷却剤に浸漬する試験装置を用い, ポリマー, ZN-04, 20 vol.% 水溶液を試料として, アームを揺動回転させた場合の回転揺動パターンと MHF 点温度の関係, Pt 球接線速度と MHF 点温度の関係並びに, 高速度ビデオ観察による蒸気膜崩壊様相を調べた。本浸漬急冷実験範囲において得られた結果を以下に示す。

(1) アームを揺動回転させて折返し時に生じる急停止と急移動の衝撃により, 蒸気膜を強制的に崩壊させることができることを確認した。

(2) アーム回転揺動パターンが Type A (最大回転角度が 120° , 戻し角度 60°) と Type D (最大回転角度が 100° , 戻し角度 20° . 戻し角度が 20°) で MHF 点温度のばらつきが小さくなることがわかった。

(3) Type A において, 接線速度の増大に伴って MHF 点温度が高くなる傾向があった。蒸気膜が受ける浮力を考えれば, 冷却特性の評価には Type D より, 鉛直軸を対称軸としてアームを揺動させる Type A が望ましいと考えられる。

(4) 接線速度が $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ では蒸気膜は破裂的な崩壊ではなく捲れ型崩壊となるばあいがあり, 捲れ型の崩壊の MHF 点温度が最も低かった。蒸気膜の崩壊起点は Pt 球とアームの接続部であると考えられたが, 破裂型崩壊と捲れ型崩壊のいずれにおいても Pt 球とアームの接続部である場合は少なく, Pt 球のよどみ点側が崩壊の起点になる場合が多かった。

最後に, 本研究を進めるにあたり (有) アリモテック取締役の有本享三氏, また, 高周波熱錬 (株) 研究開発本部の生田文昭氏の両氏に有益なご助言を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- 島岡三義, 中村篤人, 第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pdf file No. 1840 (2017-5).
- 島岡三義, 中村篤人, 奈良工業高等専門学校研究紀要, 53 (2017), pp. 24-29.
- 島岡三義, 吉田大志, 生田文昭, 中村篤人, 第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, CD-ROM 版, 講演番号 G111(2018-5).
- 島岡三義, 吉田大志, 生田文昭, 中村篤人, 日本機械

学会熱工学コンファレンス 2018 講演論文集, No. 18-29
(2018), 電子データ pdf File No. 0013.

- (5) 島岡三義, 中村篤人, 奈良工業高等専門学校研究紀要, 54(2018), pp. 21-26.
- (6) 島岡三義, 吉田大志, 生田文昭, 池田修啓, 中村篤人, 第 56 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, USB 電子データ版, 講演番号 B321.
- (7) 島岡三義, 吉田大志, 生田文昭, 池田修啓, 中村篤人, 日本機械学会 2019 年次大会講演会論文集, J05201(2019-9).
- (8) 島岡三義, 中村篤人, 池田修啓, 奈良工業高等専門学校研究紀要, 55(2019), pp. 21-27.